

TECHNICKÁ UNIVERSITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2616 - Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R011 - Elektronické informační a řídicí systémy

**Vyhodnocování magnetické asymetrie rotoru
vysokoobrátkového motoru**

Evaluation of high speed drive rotor magnetic asymmetry

Bakalářská práce

Autor: **Karel Štěpánek**
Vedoucí práce: Ing. Miroslav Novák, Ph.D
Konzultant: Ing. Josef Černožorský, Ph.D

V Liberci 3.11.2012

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: Karel Štěpánek

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

Název tématu: **Vyhodnocování magnetické asymetrie rotoru vysokoobrátkového motoru**

Vedoucí učitel projektu: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Zásady pro vypracování:

- 1) Proved'te rešerši na téma měření a hodnocení asymetrie a excentricity rotoru u BLDC a synchronních motorů.
- 2) Navrhněte a sestrojte aparaturu pro měření magnetického pole rotoru. Krokový motor bude otáčet unašečem s upevněným rotorem. Stacionární Hallovy sondy budou snímat okolní pole.
- 3) Navrhněte a naprogramujte automatické vyhodnocení asymetrie rotorů a jejich rozdělení do tříd podle kvality.
- 4) Změřte několik rotorů a zhodno'te výsledky.

Seznam odborné literatury:

David G. Dorrell, Mircea Popescu, Dan M. Ionel. Unbalanced Magnetic Pull Due to Asymmetry and Low-Level Static Rotor Eccentricity in Fractional-Slot Brushless Permanent-Magnet Motors With Surface-Magnet and Consequent-Pole Rotors. IEEE transactions on magnetics, vol. 46, no. 7, July 2010

Jiajing Fu, Changsheng Zhu. Subdomain Model for Predicting Magnetic Field in Slotted Surface Mounted Permanent-Magnet Machines With Rotor Eccentricity. IEEE transactions on magnetics, vol. 48, no. 5, May 2012

J. T. Li, Z. J. Liu, L. H. A. Nay. Effect of Radial Magnetic Forces in Permanent Magnet Motors With Rotor Eccentricity. IEEE transactions on magnetics, vol. 43, no. 6, June 2007

V Liberci dne 10. října 2012

Vedoucí učitel (podpis)

Prohlášení

Byl jsem seznámen a tím, že na mou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé práce pro vnitřní potřebu TUL

Užiji-li práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinností informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím práce a konzultantem.

Datum: 10.4.2013

Podpis:

Poděkování

Velice rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D. za jeho cenné rady a kvalitní připomínky které mi udělil při psaní této práce. Dále mi dovoluji, abych poděkoval své rodině, která mě vždy podporovala a věřila ve mě.

Bibliografická citace práce

ŠTĚPÁNEK, Karel. *Vyhodnocování magnetické asymetrie rotoru vysokoobrátkového motoru*. Liberec, 2013. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Vedoucí práce Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou magnetické asymetrie a excentricity rotoru BLDC motoru. První kapitola se stručně zabývá BLDC motorem jako celkem. Druhá kapitola popisuje magnetické vlastnosti látek v širším pojetí a zajímá se o konkrétní magnety používané pro BLDC a synchronní motory. Ve třetí kapitole si popíšeme způsoby vyhodnocování excentricity pomocí numerických modelů a přímého měření. Teoretickým návrhem měření se zabývá čtvrtá kapitola, je zde podrobně popsáno složení měřicího stanoviště. V předposlední, páté kapitole, se budeme věnovat samotnému měření a zpracování dat. Na závěr této práce shrneme dosažené výsledky a porovnáme je s teoretickým modelem.

Klíčová slova

BLDC motor, EC motor, excentricita, nevyváženost, magnetická indukce, samarium-kobaltové magnety, neodymové magnety

Abstract

This bachelor thesis deals with the problematics of magnetic asymmetry and rotor exentricity of BLDC motor. The first chapter briefly discusses BLDC motor as a whole. The second chapter describes magnetic properties of materials in a broader sense and is interested in a particular magnets used for BLDC and synchronous motors. The third chapter describes methods of evaluating eccentricity using numerical models and direct measurement. The fourth chapter describes in detail the theoretical proposal of measurment and composition of the measuring station.

The penultimate chapter five is focused on making the measurements and data processing.

At the conclusion of this paper we summarize the results and compare them with the theoretical model

Keywords

BLDC motor, EC motor, eccentricity, imbalance, magnetic induction, sanarium-cobalt magnets, neodymium magnets

Obsah	
1 Úvod	10
2 Princip činnosti BLDC motoru.....	11
3 Rozbor magnetických vlastností.....	13
3.1 Magnetické pole.....	13
3.2 Rozdělení materiálů pomocí magnetických vlastností.....	14
3.3 Permanentní magnety ze vzácných zemin	14
3.3.1 Samarium-kobaltové magnety (SmCo)	15
3.3.2 Neodymové magnety (NdFeB)	16
4 Vyhodnocování magnetické excentricity	17
4.1 Hallova sonda	17
4.1.1 Hallův jev	18
4.1.2 Hallova sonda A1302.....	18
5 Návrh měřicího stanoviště	20
5.1 Použitá Měřicí karta	21
5.1.1 Analogový vstup	21
5.2 Držák Měřicí hlavy.....	23
5.3 Měřicí hlava	24
5.4 Motor pro otáčení rotorem.....	25
5.4.1 Program pro otáčení motoru.....	26
5.5 Program pro samotné měření.....	28
5.6 Program pro vyhodnocení měření	30
6 Naměřená data.....	32
7 Závěr.....	39
9 Použitá literatura.....	40
Seznam obrázků	42
Seznam tabulek	42
Seznam Grafů	43
10 Přílohy	44

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

BLDC	bezkartáčový stejnosměrný motor (Brushless DC)
EC	elektronicky komutovaný
SmCo	Samarium-kobaltové magnety
NdFeB	Neodymové magnety
IPM	interior permanent magnet
SPM	surface permanent magnet
PC	osobní počítač
B	Magnetická indukce
dl	element délky
I	volné elektrické proudy
I_l	vázané elektrické proudy
μ_0	permeabilita vakua
μ_r	relativní permeability materiálu
H	magnetická intenzita
A/D	analogově digitální
BH_{max}	maximální energetický součin
B_r	remanence
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
FIFO	typ paměti (první dovnitř první ven)
ASCII	kódová tabulka definující znaky anglické abecedy
RS232	komunikační rozhraní mezi kontrolérem a PC
EEPROM	speciální typ paměti
USB	komunikační rozhraní mezi měřicí kartou a PC
SMD	surface mounted device
LED	light-emitting diode

1 Úvod

Uvedení BLDC motoru na trh znamenalo jistým způsobem převratnou událost v problematice stejnosměrných motorů. Tyto motory mají všechny výhody stejnosměrných motorů bez toho, aniž by převzaly největší nevýhody. Jelikož se jako rotory používají permanentní magnety vyrobeny ze vzácných zemin jako jsou Samarium-kobaltové SmCo a neodymové NdFeB, jejichž remanentní magnetická indukce je okolo 1 T a intenzita potřebná k odmagnetování dosahuje hodnot až $900 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$. Dokázaly nahradit velké stejnosměrné motory za menší a lehčí bez toho, aniž by ztratily výsledný moment.

Předpokládá se, že permanentní magnety ze vzácných zemin budou poskytovat konstantní magnetické pole po celou svou životnost. V praxi tomu však tak není a je zapotřebí tyto změny magnetického pole změřit a pokusit se navrhnout řešení, které by tento problém vyřešilo.

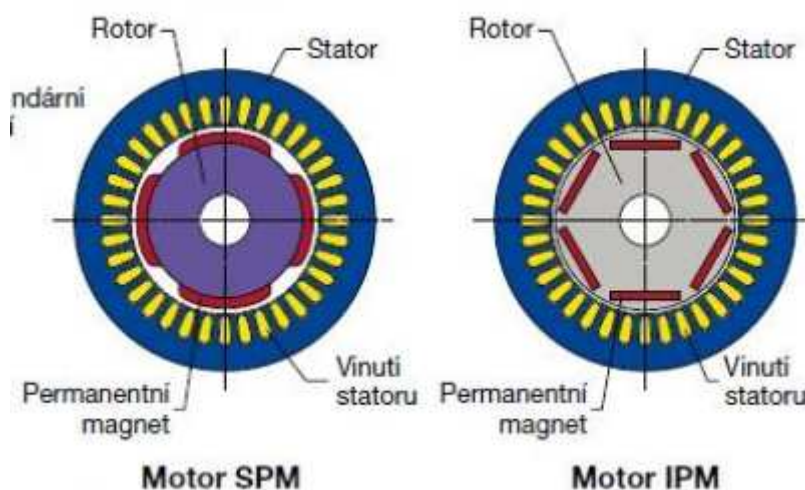
Tato bakalářská práce popisuje, problematiku magnetické asymetrie a její vyhodnocování. Budeme se zabývat polarizací jednotlivých pólů, velikostí magnetické síly pólů. Téma této práce jsem si vybral hned z několika důvodů. Již dříve jsem se obeznámil s problematikou BLDC motorů, s jejich konstrukčním řešením atd.

Tato bakalářská práce si klade za cíl, navrhnout a zrealizovat měřicí stanoviště, pro měření a vyhodnocení magnetické excentricity u konkrétního typu magnetu používaného jako rotor BLDC motoru. Tímto tématem se především zabývají [2], [3] a [4], z těchto pramenů jsem se inspiroval. Popisují především jaký vliv má excentricita na životnost motoru, jak se dá určit a její matematický popis. Také se zmiňují, že v současné době není tento problém dostatečně prozkoumán. Je zapotřebí věnovat se mu o něco intenzivněji, a proto si myslím, že tato práce bude přínosem k tomuto tématu. Podobným tématem se zabýval kolega Lacko v [5].

2 Princip činnosti BLDC motoru

Elektronicky komutovaný motor (BLDC motor = brushless DC motor) nazývaný také EC motor. Jedná se v podstatě o "obrácený" stejnosměrný motor. Obrácený v tom smyslu, že nemá magnety ve statoru jako klasický stejnosměrný motor, ale má magnety na rotoru a vynutí ve statoru. BLDC motor má stator, který se neliší od statoru třífázového asynchronního nebo synchronního stroje. Dále se tímto problémem zabývá [1] a [5].

Rotor může mít magnety umístěny uvnitř rotoru, v anglické literatuře označovány jako IPM (interior permanent magnet). Nedochází ke koncentraci magnetického toku a indukce permanentních magnetů je shodná s magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře, nebo s magnety na povrchu rotoru, v anglické literatuře označovány jako SPM (surface permanent magnet). Zobrazeno na obrázku 1.

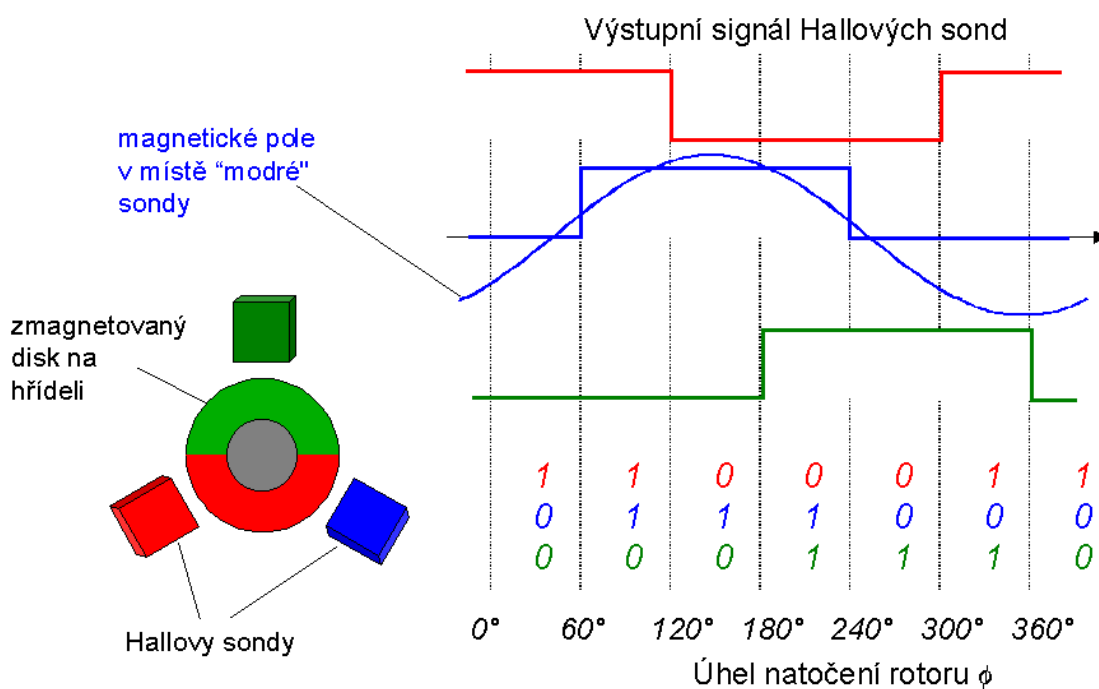


Obr. 1 Konstrukce BLDC s permanentními magnety Zdroj:Control Engineering

Funkci komutátoru přebírá tranzistorový měnič, který podle polohy rotoru přepíná proud do jednotlivých statorových vinutí. Čímž odpadá největší nevýhoda stejnosměrných motorů, které jsou jinak komutované pomocí kartáčků a kroužků na hřídeli. Tyto kartáčky se opotřebovávají a musí se občas vyměnit.

Abychom byli schopni včas přepnout fáze ve statorových vinutích, musíme zajistit snímání polohy rotoru diskrétně po 60° nebo po 120° . Pro snímání polohy rotoru se používají nejčastěji magnetické nebo fotoelektrické snímače.

Postupným spínáním jednotlivých cívek dochází ke vzniku vnitřního momentu rotoru ve směru otáčení rotoru. O spínání cívek se starají výkonové spínací tranzistory, schéma zapojení je na obrázku 2. Za pomoci signálů z Hallových sond jsou spínány dvojice tranzistorů a proud protéká pouze dvojicí fází, třetí je odpojena. Otáčky BLDC motoru jsou řízeny spínací frekvencí tranzistorů.



Obr. 2 Spínání pomocí polohy rotoru převzato z [11]

Materiály používané na výrobu permanentních magnetů jsou samarium (SmCo), neodymové magnety přesněji (NdFeB), které patří do skupiny vzácných zemin, nebo tvrdé ferity (Durox, apod.). Tyto magnety budou zmíněny v kapitole 3.3. U permanentních magnetů je nebezpečí odmagnetování vlivem vysoké teploty tzv. Curieovi teploty, např. při přetížení motoru.

V dnešní době jsou BLDC motory velice rozšířeny v mnoha odvětvích průmyslu. Jejich aplikace je od malých rychlých motorů pro PC ventilátory až po robustní vysokovýkonné stroje, například pro elektromobily.

3 Rozbor magnetických vlastností

3.1 Magnetické pole

Tato práce se zabývá měřením magnetické excentricity a nesymetrie motoru. Abychom byli schopni určit o jaké pojmy se jedná, musíme si nejprve nadefinovat prvky, které tento motor fyzikálně určují.

V okolí pohybujícího se elektrického náboje, nebo permanentního magnetu (jedná se o trvale nebo jen dočasně zmagnetizované těleso) vzniká magnetické pole. Z počátku teorie o vzniku magnetického pole vycházela z Ampérovy domněnky. Tvrdila, že existence elementárních proudů v látce zapříčiňuje její magnetické vlastnosti. S objevem atomového jádra a elektronu bylo možné Ampérovu domněnku potvrdit a upřesnit. Vektor magnetické indukce \mathbf{B} ukazuje velikost silového působení magnetického pole a je popsán vztahem 2.1,

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0(I - I_l) \quad (2.1)$$

kde $d\mathbf{l}$ je element délky, μ_0 permeabilita vakua, jedná se o fyzikální konstantu a má hodnotu $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$, I volné elektrické proudy, I_l vázané proudy. Jednotka magnetické indukce \mathbf{B} je Tesla [T]. Velikosti magnetické indukce (řádově):

silný permanentní magnet 10^{-2} až 10^{-1} T ,

silný laboratorní magnet 10 T (pulzní nebo supravodivý),

magnetické pole Země v ČR 10^{-5} T .

Dalším vektorem, který charakterizuje magnetické pole je magnetická intenzita \mathbf{H} . Pro tento vektor platí vztah 2.2

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (2.2)$$

Magnetické pole v látce si můžeme představit za použití magnetických indukčních čar, jedná se o spojitě čáry, které představují magnetické pole v okolí magnetu. **Severní magnetický pól (N)** je místo, kde magnetické indukční čáry vystupují z magnetu a **Jižní magnetický pól (S)** je místo, kde vstupují do magnetu.

3.2 Rozdělení materiálů pomocí magnetických vlastností

Pomocí velikosti μ_r relativní permeability materiálu, která ovlivňuje chování látky ve vnějším magnetickém poli, lze provést následující dělení:

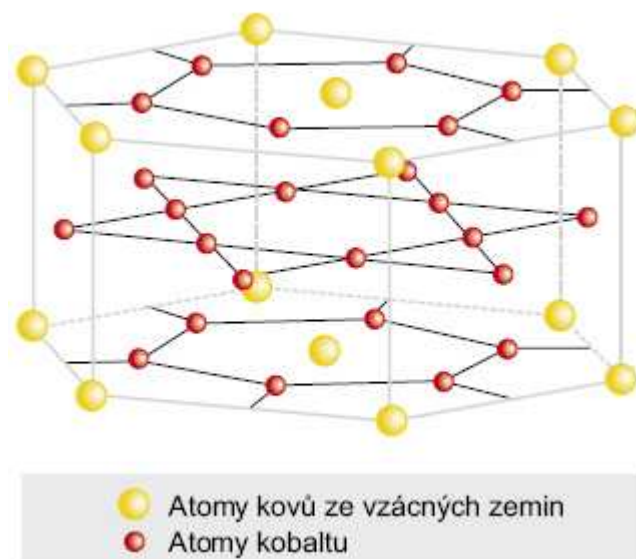
- **Diamagnetické látky** $\mu_r < 1$, u těchto materiálů dochází k vzájemnému rušení orbitálních a spinových magnetických momentů, výsledný magnetický moment je záporný. To způsobí nepatrné zeslabení magnetického pole. Materiálů s těmito vlastnostmi je poměrně málo, patří mezi ně např. všechny inertní plyny (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn) a některé kovy (Cu, Ag, Au, Hg, Bi) a také voda.
- **Paramagnetické látky** $\mu_r > 1$, mají magnetický moment různý od nuly, i bez přiložení vnějšího magnetického pole. Přiložíme-li vnější magnetické pole, snaží se magnetické momenty jednotlivých atomů orientovat vždy do směru tohoto pole. Tyto látky magnetické pole zesilují a patří sem látky např. hliník, mangan, chrom a platina
- **Feromagnetické látky** $\mu_r \gg 1$, jedná se vlastně o paramagnetické látky, které ovšem mají jiné uspořádání krystalové mřížky, tvoří tzv. domény. Stačí polarizovat pouze jeden atom a ostatní se zpolarizují také. Speciální skupinu tvoří feritomagnetické látky čili ferity. Jedná se o sloučeniny oxidu železa a oxidy jiných kovů pro značné zesílení magnetického pole.

3.3 Permanentní magnety ze vzácných zemin

Tyto permanentní magnety tvoří skupinu nejsilnějších trvalých magnetů jaké kdy byli vyrobeny. Nejčastěji obsahují neodym a samarium. Díky těmto magnetům je mnohem lépe umožněno zmenšování rozměrů. Nepotřebujeme tak velký magnet, abychom dosáhli stejné síly magnetu. Magnety jsou poměrně tvrdé, ale křehké.

3.3.1 Samarium-kobaltové magnety (SmCo)

Poprvé se objevily již v 80 letech 20. století, v současnosti se vyrábí ve dvou poměrech Sm a Co. Krystalografická buňka SmCo_5 je na obrázku 3, což je jeden atom samaria a 5 atomů kobaltu. Druhý poměr je $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ tento poměr má větší B_r a lepší teplotní závislost. Maximální energetický součin BH_{max} je více než pět krát větší než u feritových magnetů nebo magnetů AlNiCo . Vyrábějí se buďto metodou práškové metalurgie, nebo lisováním v magnetickém poli a následným spékáním. Samarium-kobaltové magnety se používají v malých motorech, měřicích a kontrolních přístrojích, proudových generátorech, v motorech pro elektromobily a v mnoha dalších zařízeních. Výhodou samarium-kobaltových magnetů je bezesporu stabilní magnetické pole ve velkém teplotním rozsahu ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $300\text{ }^{\circ}\text{C}$). V dnešní době se již samarium-kobaltové magnety skoro nepoužívají pro jejich vysokou cenu, byly nahrazeny Neodymovými magnety.

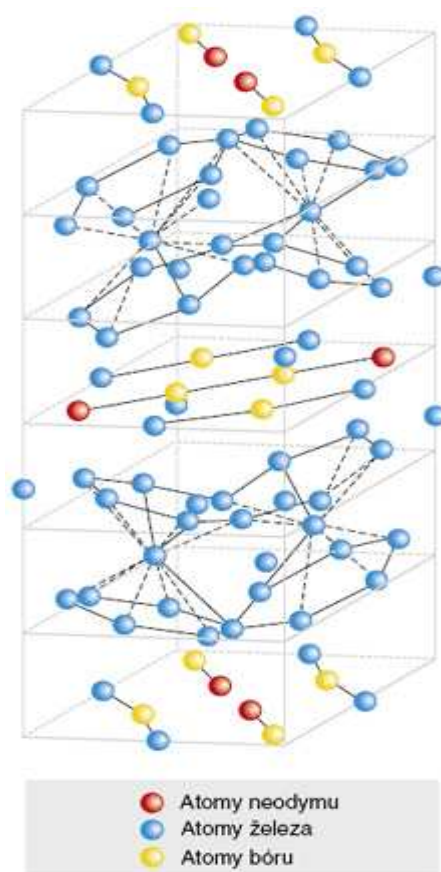


Obrázek 3 Krystalografická buňka krystalu SmCo_5 převzato z [16]

3.3.2 Neodymové magnety (NdFeB)

Po příchodu samarium-kobaltových magnetů se hledala levnější cesta k výrobě stejně účinného magnetu. Toto se povedlo v roce 1984 kdy se poprvé objevil neodymový magnet. Neodymový magnet obsahuje dva atomy neodymu, čtrnáct atomů železa a jeden atom boru. Výsledná slitina $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ je zobrazena na obrázku 4. Vyrábějí se buďto metodou práškové metalurgie, nebo lisováním v silném magnetickém poli a následným spékáním. Mají některé lepší vlastnosti než samarium-kobaltové magnety a to především: nižší cenu, vyšší hodnotu maximálního energetického součinu BH_{max} , a také vyšší mechanickou odolnost (nejsou tak křehké jako SmCo). Aby mohl být NdFeB vůbec opracován je zapotřebí použít diamantových kotoučů a chlazení. Mezi velké nevýhody patřily z počátku výroby nižší pracovní teploty a především náchylnost ke korozi. Dnes již není náchylnost ke korozi takový problém, používají se povrchové úpravy jako např. pozlacení, chromování, epoxidace, pasivace a mezi nejnovější technologie patří potahování hliníkem a nitridem titánu.

Obrázek 4 Krystalografická buňka krystalu $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ převzato z [16]



4 Vyhodnocování magnetické excentricity

Nejprve si nadefinujme co to vlastně excentricita je. Pokud použijeme slovník cizích slov dostaneme překlad (výstřednost, nesoustřednost, nápadnost, odchylnost), použil jsem internetový slovník <http://slovník-cizich-slov.abz.cz>. Pokud použijeme Česko-Anglický slovník dostaneme tyto výrazy (výstřednost, podivínství, zvláštnost, nezvyklost), takže co to vlastně je ?

Excentricita v našem případě je určitá odchylka magnetického pole od ideálního stavu. To znamená, že chceme, aby okolo celého magnetu, který měříme, bylo pořád stejné konstantní magnetické pole, a aby všechny sektory magnetizace byly stejně velké. Toho však v reálných případech spíše nedosáhneme nebo to nezaplátíme. Proto musíme zavést excentricitu a určit kdy je magnet ještě v pořádku a kdy již ho není možné použít.

Musíme si uvědomit, že excentricita mezi statorem a rotorem vysokootáčkového stroje vzniká již při výrobě stroje. Je způsobená nevyvážeností rotoru, vůlí v ložiscích nebo ne zcela rovnou hřídelí. Všechny tyto jevy přispívají k opotřebení motoru, hlučnosti a vzniku vibrací. Pokud se zabýváme excentricitou, je potřeba vysokoobrátkové stroje rozdělit do dvou kategorií a to na motory IPM s vnitřními permanentními magnety a SPM s povrchovými permanentními magnety. Magnetické síly v motoru představují vážný problém, když se jedna nebo více jejich frekvencí shoduje s mechanickou frekvencí stroje.

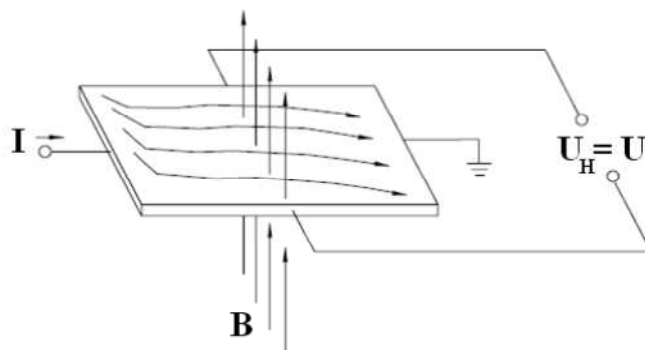
4.1 Hallova sonda

Jedná se o dnes běžně dostupnou polovodičovou součástku, která má velký význam při určování velikosti magnetické indukce, ale používá se také jako snímač otáček. Její princip vychází z Hallova jevu který je popsán v následující kapitole. Výrobou Hallových sond se zabývá velké množství výrobců. Většina sond má v určitém rozsahu vnější magnetické indukce lineární závislost výstupního napětí.

Hallova sonda se dá použít k určení směru vektorů \mathbf{H} a \mathbf{B} . Mezi další uplatnění patří možnost použít sondu jak na stejnosměrné magnetické pole tak na střídavé. Výstupem je elektrické napětí. Jednou z hlavních výhod Hallové sondy jsou malé rozměry a schopnost neovlivnit měření rušením měřeného magnetického pole.

4.1.1 Hallův jev

Základem je takzvaný "Hallův prvek". Jedná se o destičku vyrobenou z polovodičového materiálu, na který jsou připevněny elektrody, jak je vidět na obrázku 5.



Obrázek 5 Hallův prvek převzato [8]

Pokud na prvek působí magnetické pole kolmé na směr proudu, působí na nabitou částici Lorenzova síla podle vzorce 3.1, tato síla naruší rozdělení proudu a dochází k rozdílu potenciálu mezi stranami destičky.

$$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (3.1)$$

Rozdíl potenciálů (napětí) se značí U_H jako Hallovo napětí a vypočte se pomocí vzorce 3.2

$$U_H = I \times B \quad (3.2)$$

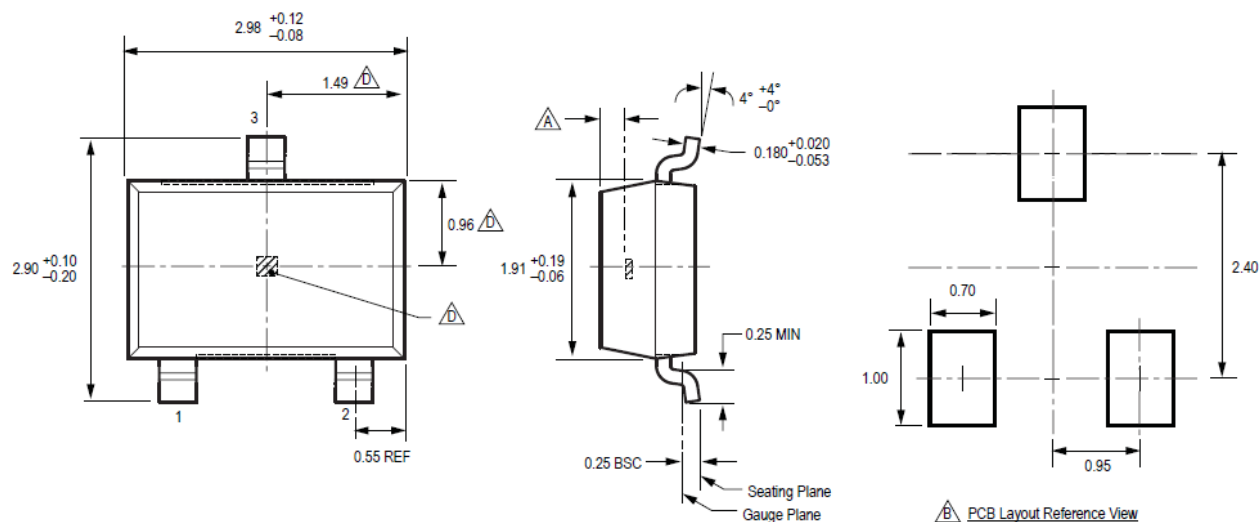
Toto napětí je velmi malé, proto se dnes do Hallovy snímáče integrují operační zesilovače, aby došlo k zesílení na běžná napětí.

4.1.2 Hallova sonda A1302

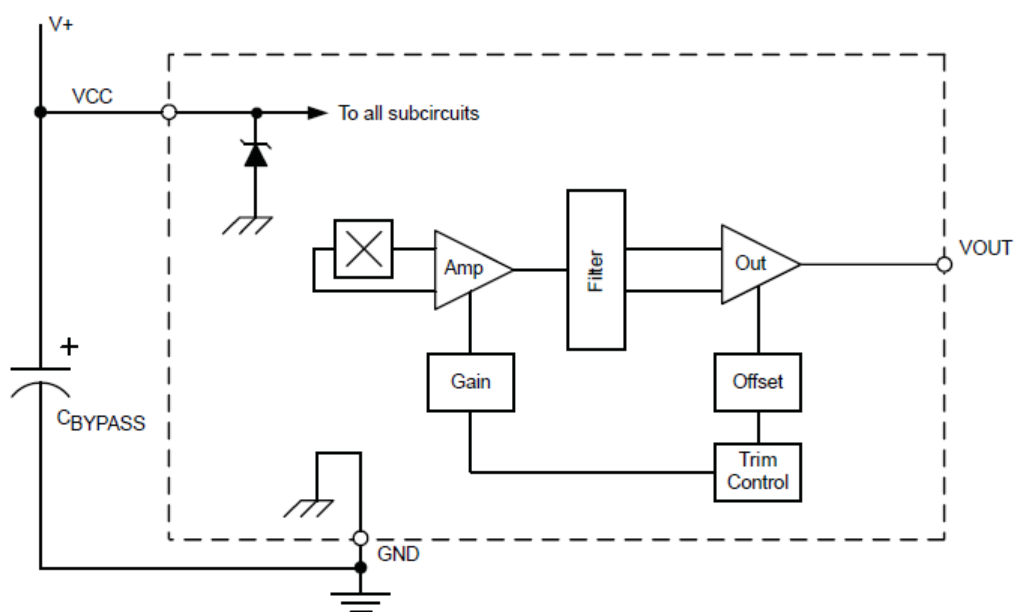
Pro účely této práce byly vybrány tři Hallovy sondy stejného typu od firmy Allegro A1302, které svými vlastnostmi dostačují našim požadavkům. Vnitřní zapojení je na obrázku 7. Tyto poměrové lineární Hallovy sondy poskytují výstupní napětí úměrné magnetické indukci, která na ně působí. Jejich klidové napětí (když na ně nepůsobí žádné magnetické pole) je určeno polovinou napájecího napětí. Každý CMOS prvek Hallovy sondy má teplotně kompenzační obvody pro snížení vnitřní citlivosti a operační zesilovač s nízkým výstupním odporem a automatické dynamické vyrovnaní offsetu Hallova elementu. Tyto sondy jsou uloženy v pouzdře SOT23W, které je na obrázku 6. Další fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v [13], některé vybrané jsou pak umístěny v tabulce 1.

Tabulka 1 Vybrané parametry hallovy sondy převzato s upravení z [13]

Charakteristika	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Napájecí napětí	Vcc	4,5	-	6	V
Napájecí proud	Icc	-	-	11	mA
Klidové výstupní napětí	Vout(k)	2,4	2,5	2,6	V
Citlivost	Sens	1	1,3	1,6	mV/G
Šířka pásma	fc	-	20	-	kHz



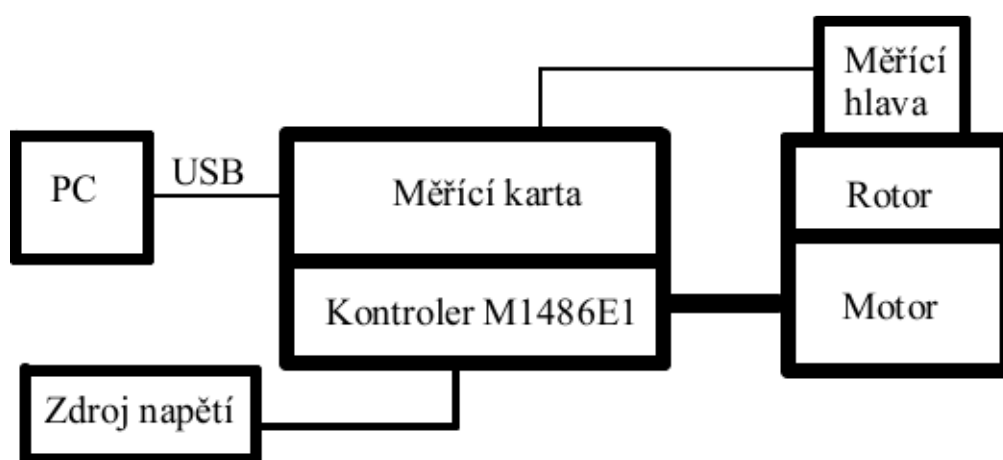
Obrázek 6 Pouzdro SOT23W převzato z [13]



Obrázek 7 Blokové schéma Halllovy sondy převzato z [13]

5 Návrh měřicího stanoviště

Měřicí stanoviště se skládá z krokového motoru, který je použit k otáčení měřeného rotoru, abychom nemusely otáčet s Hallovými sondami. Pro ovládání krokového motoru je připojen kontrolér M1486E1 od firmy Microcon, který je napájen zdrojem napětí. Měřicí hlava jsou vlastně 3 Hallové sondy spojené s měřicí kartou NI USB 6212 a tato karta poskytuje pomocí rozhraní USB data zpracovávaná na PC pomocí softwaru. Schéma zapojení je na obrázku 8. Měřicí stanoviště bylo zapojeno podle obrázku 9. Níže si popíšeme jednotlivé členy.



Obrázek 8 Schéma zapojení měřicího stanoviště



Obrázek 9 Měřicí stanoviště

5.1 Použitá Měřicí karta

Pro připojení výstupů halových sond s počítačem byla využita měřicí karta od National instruments NI USB 6212, zobrazena na obrázku 10. Tato karta byla vybrána proto, že nepotřebuje externí napájení a je napájena přes USB připojení, má přijatelné rozměry a především byla k dispozici. Multiplexovaný A/D převodník na kartě také dostačuje. Karta má 16 multiplexovaných, 16-ti bitových analogových vstupů ± 10 V, což pro naše účely bohatě stačí, neboť využíváme pouze tři tyto vstupy. Maximální vzorkovací frekvence je 400 kHz.



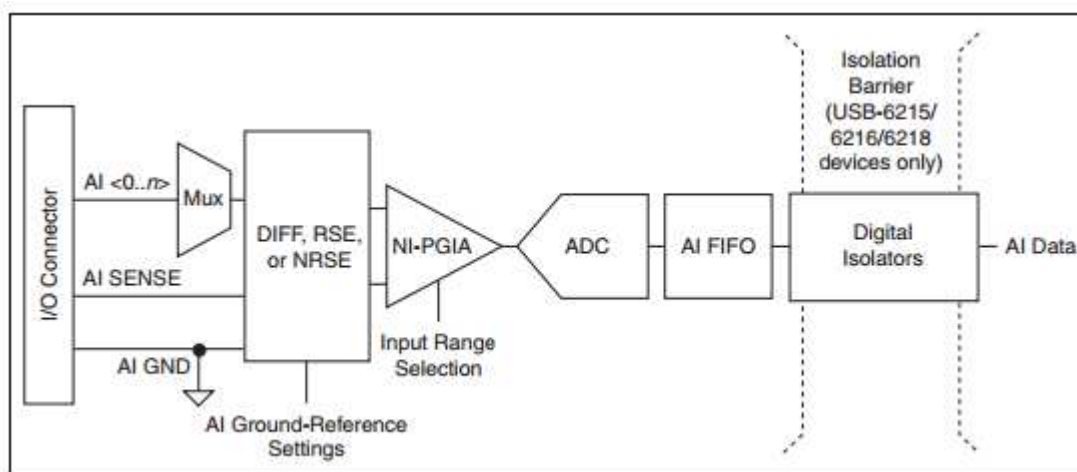
Obrázek 10 Měřicí karta NI USB 6212

5.1.1 Analogový vstup

Na obrázku 11. je znázorněno blokové schéma analogového vstupu karty NI USB 6212. V první řadě se vstupní data dostanou na vstupně / výstupní piny (I/O Connector), kam je možné připojit i digitální signál. Dále signál prochází přes multiplexor, který připojuje jednotlivé analogové vstupy. Odsud signál projde přes referenční nastavení do zesilovače, kde se provede zesílení nebo zeslabení tak, aby bylo zajištěno maximální rozlišení AD převodníku. Poté se signál uloží do paměti typu FIFO (First In - First Out) neboli první dovnitř první ven, tato paměť zajišťuje, aby nedošlo ke ztrátě dat. Tato měřicí karta má možnost měnit nastavení zemnicího signálu. Rozhoduje jakým způsobem jsou vstupní signály připojeny k modulu.

Tyto nastavení jsou:

- 1) Rozdílový (diferenciální) režim (DIFF)
- 2) Referenční uzemněný režim (RSE)
- 3) Nereferenční uzemněný režim (NRSE)



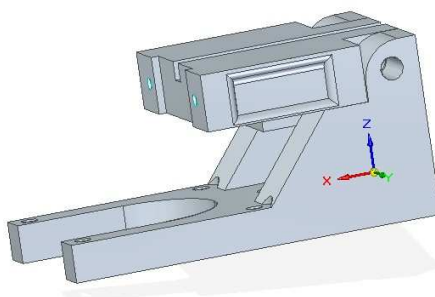
Obrázek 11 Schéma analogového vstupu převzato z [14]

Pro naše měření bylo důležité, že použitá měřicí karta podporovala simultánní spuštění všech tří kanálů. V tomto režimu vícekanálového sběru dat je možno nastavit zpoždění mezi jedním a druhým kanálem, dále se dá nastavit vzorkovací perioda (Sample Period), za kterou je odebrán jeden vzorek. Pokud není určena převodní frekvence, je použita maximální možná převodní frekvence v závislosti na A/D převodníku. K této frekvenci se přidá 10 μ s mezera mezi každý signál, díky tomu je zajištěna dostatečně dlouhá doba k ustálení signálu. Naše měřicí karta má maximální vzorkovací frekvenci $f_{vz} = 400$ kHz, což pro 3 připojené kanály znamená, že jeden kanál má maximální vzorkovací frekvenci $400/3 = 133$ kHz. Z této vzorkovací frekvence lze pomocí vzorce 4.1 spočítat minimální možnou dobu t_{vzmin} která je potřeba pro odebrání vzorku z každého kanálu.

$$t_{vzmin} = \left(\frac{1}{f_{vz}} + t_{pauza} \right) * PK = (7,5\mu s + 10\mu s) * 3 = 52,5\mu s \quad (4.1)$$

5.2 Držák Měřicí hlavy

V mé práci bylo za úkol navrhnout a nechat zhotovit držák měřicího přípravku, který se připevní přímo na motor otáčející měřeným rotorem. Velký důraz byl kladen na tuhost. Toto se podařilo zajistit přídatnými vzpěrami, jak je vidět na obrázku 12. Držák musel být schopen udržet měřicí hlavu v klidu, po celou dobu měření. Případné otřesy by mohli narušit samotné měření. Ukládání měřeného rotoru je zajištěno kloubem, který umožní zvednout měřicí hlavu a mít tak dostatek prostoru pro manipulaci s rotorem. Jako materiál pro výrobu držáku se použil plast, neboť je magneticky rezistentní a nebude ovlivňovat měření. Technická dokumentace je v příloze C. Tento držák byl vyvinut v 3D modelovacím prostředí Solid Edge ST5. Prostředí Solid Edge je velice příjemné prostředí pro tvorbu jakýchkoliv součástek. Má uživatelsky příjemné prostředí, ve kterém se dá dobře zorientovat již po pár minutách používání softwaru. Další nespornou výhodou je, že společnost Siemens Industry Software s.r.o. poskytuje tento program zcela zdarma pro studenty jakýchkoli škol.

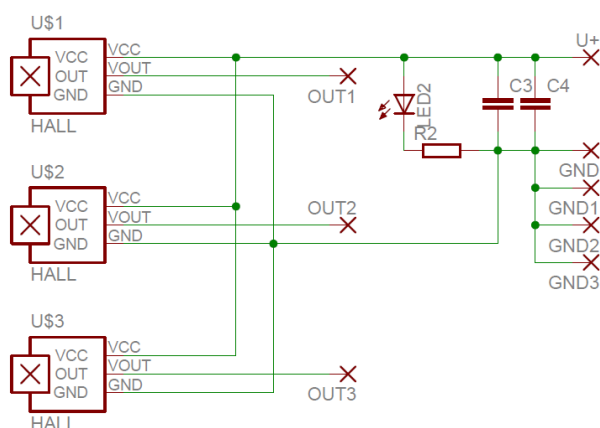


Obrázek 12 Vytvořený držák v programu Solid Edge ST5

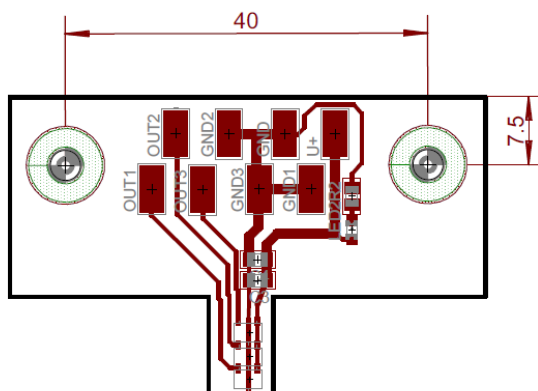
Tento držák byl vyroben za pomoci 3D tisku na zařízení Objet Connex 500, které vlastní Fakulta strojní, katedra výrobních systémů. Držák musel být z magneticky imunního materiálu aby neovlivňoval měření.

5.3 Měřicí hlava

Aby bylo možné tuto bakalářskou práci zrealizovat, bylo zapotřebí navrhnout a vyrobit měřicí hlavu. Jedná se o desku plošných spojů, na které jsou zapojeny 3 Hallové sondy, dva vyhlazovací kondenzátory, LED dioda a rezistor. Zapojení je vidět na obrázku 13. Všechny součástky, které jsme použili, jsou v SMD pouzdře. Sondy slouží jako snímače magnetické indukce, viz v kapitole 4.2. Na obrázku 14. je vyobrazen plošný spoj. Jeho návrh probíhal v prostředí určenému na výrobu plošných spojů s názvem EAGLE 6.4.0 Lite. S tímto programem jsem se poprvé setkal při výuce předmětu Elektronická zařízení na TUL.



Obrázek 13 Schéma zapojení měřicí hlavy



Obrázek 14 Návrh plošného spoje

Plošný spoj byl zhotoven na Technické univerzitě pod Ústavem informačních technologií a elektroniky.

5.4 Motor pro otáčení rotorem

Abychom mohli změřit magnetické pole rotoru po celém jeho obvodu, bylo zapotřebí s rotorem otáčet kolem Hallových sond. K tomuto účelu jsme využily dvou fázový krokový motor PK266M-02A od firmy Oriental motor. Více informací o tomto motoru je v příloze.

Motor není samostatně použitelný, proto je připojen ke kontroléru M1486E1 od firmy Microcon. Jedná se o plně programovatelné řízení krokového motoru. Kontrolér M1486E1 je programován pomocí ASCII znaků. Povelý se předávají pomocí rozhraní RS232. Bylo zmíněno v [18] "Kontrolér typu M1486E1 může být připojen k počítači či jinému nadřazenému systému vybavenému sériovým rozhraním pouze jednou za účelem nahrání povelového souboru. Pak může být trvale odpojen a pracovat v aplikaci zcela samostatně, řízen stavy uživatelských vstupů. Vnitřní paměť pro povelý EEPROM umožňuje uchovat povelý i po vypnutí napájení, bez potřeby zálohování. V případě nutnosti změny povelového souboru je možné kontrolér znovu připojit k počítači a nahrát změněný povelový soubor."

Tento program je napsán v MATLABU a slouží k nahrání obslužného programu do paměti EEPROM na kontroléru M1486E1. Při nahrávání programu do této paměti musíme zkontrolovat vstupy ADDR0 - ADDR3. Pokud je alespoň jeden s těchto vstupů nastaven na log.0 nelze nahrát program do paměti EEPROM. Pokud již nahrajeme program do paměti a chceme ho změnit, musíme nejprve starý program z paměti smazat. Toho docílíme, když alespoň jeden vstup ADDR0 - ADDR3 nastavíme na log.0 a zmáčkeme hardwarový reset.

5.4.1 Program pro otáčení motoru

```
% seriová komunikace
if exist('comPort','var') == 1,
    fclose(comPort);
end

comPort = serial(['COM13'],'BaudRate', 4800, 'StopBits',1,'Parity','none',
'FlowControl','none',...
    'Timeout',1,'RequestToSend','on','DataTerminalReady','on');
%prirazení portu, nastavení parametru komunikace

    fopen(comPort); %otevření komunikačního kanálu
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['\' char(13)]); %reset
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['[' char(13)]); %disable
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['V500' char(13)]); %nastavení rychlosti otáčení
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['A300' char(13)]); %nastavení zrychlení
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['F256000' char(13)]); %pohyb dopředu
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['@1' char(13)]); %návěští
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['I1H2' char(13)]); %rozhodovací podmínka
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['J1' char(13)]); %skok
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['@2' char(13)]); %návěští 2
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['R' char(13)]); %roztoč
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['W1000' char(13)]); %čekání 1s
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, ['J1' char(13)]); %skok
    pause(0.5)
    fwrite(comPort, [']' char(13)]); %enable
    pause(0.5)
```

Aby bylo vůbec možné do paměti zapsat, musíme nejdříve provést reset kontroléru. Kvůli malé vstupní paměti se používají povely "Disable" ([]) na začátku programu a "Enable" ([]) na konci programu. Tyto povely umožní zapsat program přímo do paměti povelů a nehrozí přeplnění vstupní paměti. Dalším omezením je rychlost zápisu do paměti. Je třeba použít povel pause, aby jednotlivé povely trvaly déle než 0,5 s jinak by se do paměti nestihly nahrát.

Samotný program, který se nahraje do paměti je velice jednoduchý. Nejprve nastavíme rychlost otáčení motoru, je určena tak, aby měření netrvalo příliš dlouho, ale zároveň, aby naměřená data byla použitelná. Dále nastavíme zrychlení, to nám zaručí plynulý rozjezd motoru. V dalším kroku dochází k nastavení délky otáčení, po tomto kroku je zapotřebí nastavit rozhodovací podmínku. Pokud je vstup B1 nastaven na hodnotu log.1 spustí se otáčení motoru. Pokud však je B1 v log.0 provede se skok na podmínku a takto zacyklený program čeká na změnu B1. Na konci programu se provede pouze čekání.

Protože kontrolér není připojen k PC, využily jsme uživatelský vstup B1. Ten jsme propojily s měřicí kartou NI USB 6212 tak, aby když spustíme měřicí program nastavila B1 na hodnotu log.1, na což reaguje program nahraný v paměti tím, že roztočí motor. Uživatelské vstupy jsou galvanicky odděleny pomocí optočlenů. Zapojení je na obrázku 15. vstupy C1 a C6 jsou piny na konektoru Cannon 15F.



Obrázek 15 Uživatelský vstup

5.5 Program pro samotné měření

Aby bylo vůbec možné samotné měření zrealizovat, museli jsme nainstalovat obslužné programy. Nejprve jsme nainstalovali ovladače pro komunikaci měřicí karty NI USB 6212 s PC. Následně jsme nainstalovali MATLAB, v tomto bodě si musíme dát pozor na to jakou verzi MATLABU máme nainstalovanou. Starší verze nekomunikují s novými ovladači měřicí karty. Programy si nepředávají potřebné informace a nezískáme data pro zpracování.

Abychom byli schopni určit výsledky měření, bylo zapotřebí napsat obslužný program pro samotné měření. Tento program byl tvořen v MATLABU. MATLAB je výpočetní systém využíváný pro vědeckotechnické výpočty, modelování, simulaci, analýzu a prezentaci dat, návrhu algoritmů, měření a zpracování signálů. MATLAB se dá použít pro vývoj velkého množství aplikací nebo také pro komfortní interaktivní práci. Uživatelé MATLABU mají k dispozici grafické a výpočetní nástroje spolu se specializovanými knihovnami funkcí a programovacím jazykem čtvrté generace.

```
%% priprava nazvu souboru pro ukladnani dat
fileNamePrefix = 'RieterFAST_vz01_vnitri_';
files = dir; %vygeneruj nazev souboru s o cislo vetsi posledni
               casti (poradovym cislem)

nextFile = 0;
for i = 1:size(files,1),
    if strfind(files(i).name,fileNamePrefix) > 0,
        %hledej jen soubory zacinajici na tento text
        ib = strfind(files(i).name, '.mat'); %najdi index pripony
        nextFile_ = sscanf(files(i).name(ib-2:ib-1), '%d');
        %precti hodnotu posledni casti
        if nextFile_ > nextFile, nextFile = nextFile_; end;
        %vyhledej jen nejvetsi
    end
end
nextFile = nextFile + 1;%pricti 1

%% Analogove vstupy
DAQHWINFO('nidaq') %zobraz prehled
AI = analoginput('nidaq', 'Dev1');
        %vytvori objekt propojeni na NiDaq
AI.InputType='singleended'; %singleended differential
chan = addchannel(AI, [0 1 2]);
        %pridava kanaly do scan listu, smazat jdou novym
        vytvorenim objektu
chan.InputRange = [-5 5]; %nastaveni parametru prevodu
chan.SensorRange = [-5 5];
chan.UnitsRange = [-5 5];
SampleRate = 400000/16;
SamplesPerTrigger = SampleRate*4;
set(AI, 'SampleRate', SampleRate); %nastaveni parametru vzorkovani
set(AI, 'DriveAISenseToGround', 'On');
set(AI, 'SamplesPerTrigger', SamplesPerTrigger);

AI
SampleRate_ = get(AI, 'SampleRate'); %nastaveni parametru vzorkovani
```

```

if abs((SampleRate_-SampleRate)/SampleRate) > 0.001,
    disp(['Skutecna vzorkovaci frekvence: ' num2str(SampleRate_) '/'
num2str(SampleRate) ' SPs'])
end
SampleRate = SampleRate_;

%% Otáčení motoru
dio = digitalio('nidaq','Dev1');
hline0 = addline(dio,0,1,'OUT');
putvalue(dio.Line, [1]);
pause(0.05)
putvalue(dio.Line, [0]);

%% Vyhodnocení dat
figure(1)
clear B uh pos_
dilku = 400;
pause(2)
start(AI); %zmer - zavisi na nastaveni triggeru, implicitne je
immediate
pause(SamplesPerTrigger/SampleRate)
B = getdata(AI,SamplesPerTrigger);%natahni data
B = (B - 2.5)/1.3e1;
disp('data stazena')
plot( B.*1000)
ylabel('B (mT)')
grid on
zoom on
timeOfMeas = now;
fileName = [fileNamePrefix num2str(nextFile,'%02d')];
save(fileName,'B','timeOfMeas','SampleRate'); %uloz data
vnutFileName = 1;

```

Tento program naměří velikost magnetické indukce v okolí měřeného rotoru. Program na začátku vytvoří a pojmenuje soubor. Tím je zajištěno, že pokud budeme provádět více měření, nebudou se nám naměřená data přepisovat, ale vytvoří se nové soubory s o číslo větším pořadovým číslem. Následně se naváže komunikace s měřicí kartou a zadají se parametry pro měření jako je rozsah měřicího signálu, analogové vstupy které používáme, nastavení parametrů vzorkování. Když jsme již nastavili kartu na měření můžeme poslat na vstup kontroléru B1 log. 1 pro roztočení motoru. Roztočením motoru začíná sběr dat. Tyto data jsou vykreslena a v následném programu vyhodnocena. Obslužný program je rozdělen na dvě části, aby byl přehlednější.

5.6 Program pro vyhodnocení měření

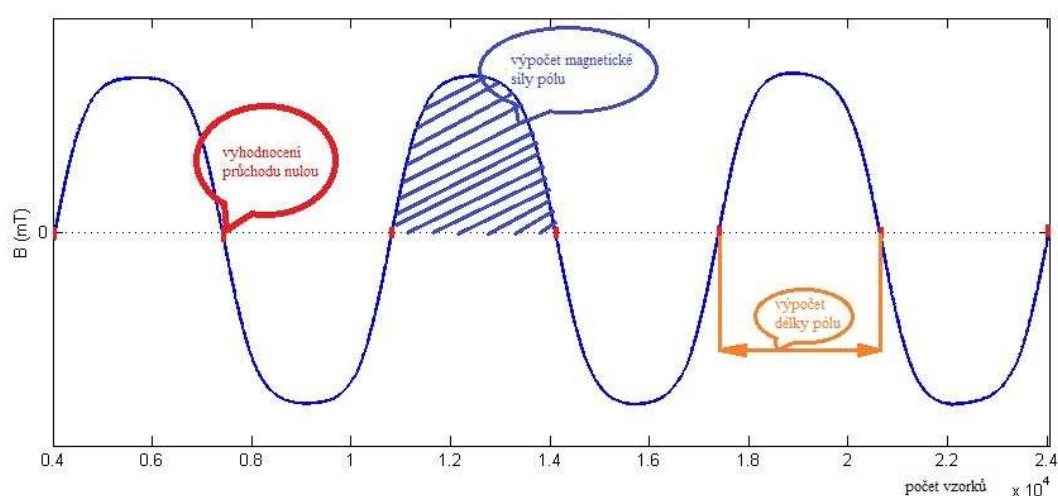
```
%zpracovani dat z mereni polarizace rotoru na pripravu
fileName = 'RieterFAST_vz04_vnitri_01.mat';
load(fileName)
disp(fileName)
%% Zpracování první sondy
pr0nA = find(diff(sign(B(:,1))) == 2); %najdi pruseci 0 prechod nahoru
pr0dA = find(diff(sign(B(:,1))) == -2); %najdi pruseci 0 prechod dolu
pr0A = sortrows([pr0nA; pr0dA]); %sluc oba vektory dohromady a
                                %serad je
pr0A = pr0A(diff(pr0A)>10); %odstrí chybu zakmitů kolem nuly
delkyA = diff(pr0A); %vypocti delky segmentu
for a = 1:6
    eval(['delkaA' num2str(a) ' = delkyA(' num2str(a) ':6:end);']) %oddel
    %6 segmentu od sebe
end
pocetPrvku = [length(delkaA1), length(delkaA2), length(delkaA3),
length(delkaA4), length(delkaA5), length(delkaA6)];
iEnd = min(pocetPrvku);
delkyA = [delkaA1(1:iEnd), delkaA2(1:iEnd), delkaA3(1:iEnd),
delkaA4(1:iEnd), delkaA5(1:iEnd), delkaA6(1:iEnd)]; %vytvor konzistentni
matice
delkyPrumery = mean(delkyA); %vypocti prumerne delky pro kazdy pol
vzorkuNa1Otacku = sum(delkyPrumery); %soucet vseh delek je jedna
otacka dokola

figure(1)
boxplot(delkyA./vzorkuNa1Otacku.*360) %krabicovy graf s normalizaci
vysleku na stupne
line([0.5 6.5],[1 1]./6.*360) %cara idealni delky polu
xlabel('Číslo pólu (-)')
ylabel('Délka pólu (°)')
title(fileName(7:end), 'Interpreter', 'none')
grid on
zoom on

%%
clear plochyA
for a = 1:length(pr0A)-1,
    plochyA(a) = sum(B(pr0A(a):pr0A(a+1))); %vypocti plochy jednotlivych
    %polu
end
plochyA = plochyA';
for a = 1:6
    eval(['plochyA_' num2str(a) ' = plochyA(' num2str(a) ':6:end);'])
    %oddel 6 segmentu od sebe
end
plochyA = [plochyA_1(1:iEnd), plochyA_2(1:iEnd), plochyA_3(1:iEnd),
plochyA_4(1:iEnd), plochyA_5(1:iEnd), plochyA_6(1:iEnd)];
%vytvor konzistentni matice
figure(2)
boxplot(abs(plochyA))
xlabel('Číslo pólu (-)')
ylabel('Magnetický síla pólu (absolutní hodnota relativně)')
title(fileName(7:end), 'Interpreter', 'none')
grid on
zoom on
```

Program vyhodnocení se dále liší pouze v indexaci pro dvě další sondy. Změní se proměnné $pr0nA$, $pr0dA$, $pr0A$, $delkyA$, $delkaA$. Tyto proměnné měníme pouze v posledním písmenu. Pro druhou sondu je to písmeno B, takže proměnné pak vypadají následovně $pr0nB$, $pr0dB$, $pr0B$, $delkyB$, $delkaB$. A pro třetí sondu je to písmeno C.

Program pro zpracování nejprve načte naměřená data. Musíme dát pozor, aby tato data byla uložena v adresáři MATLABU, jinak nejsou zpracována. Po načtení hodnot program vyhodnotí průchody nulou, kdy dojde k naměření nulové magnetické indukce, v tomto místě dochází k přechodu mezi póly. Pro další zpracování musíme nejprve vytvořit matici, kterou umí MATLAB zpracovat. Když máme konzistentní data pro zpracování, dojde k výpočtu délky pólů. Pro reprezentaci zpracovaných dat byl vybrán krabicový diagram, který umožňuje posoudit symetrii, variabilitu a existenci extrémních hodnot naměřených dat. Vykreslením grafu končí vyhodnocení délky pólů. Na obrázku 16. je znázorněno vyhodnocení. V druhé části vyhodnocujeme velikost magnetické síly pólů. K tomuto účelu používáme výpočet plochy pod křivkou, což je matematický výpočet určitého integrálu. Pro tento výpočet má MATLAB zabudovanou funkci. Tyto data vykreslíme v grafu. Tento postup se opakuje pro všechny 3 sondy. Všechny grafy jsou uvedeny v kapitole 6.

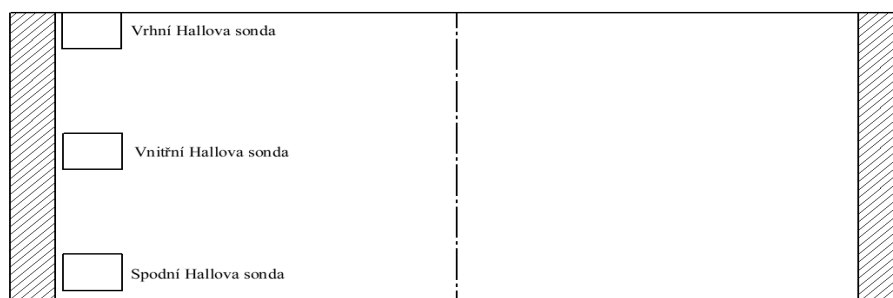


Obrázek 16 Objasnění vyhodnocení

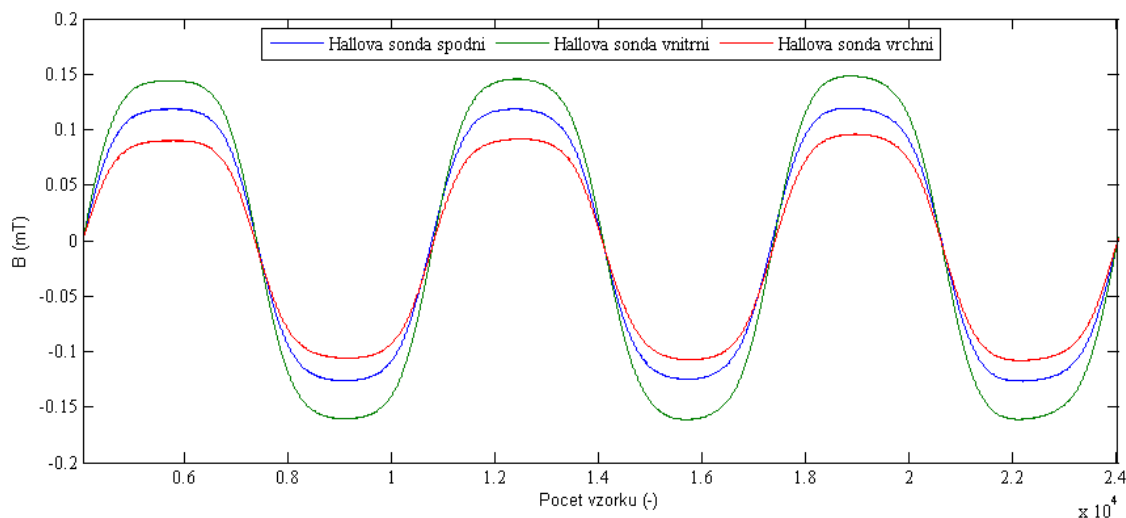
6 Naměřená data

K měření byly zapůjčeny celkem 4 rotory, které nebyly ještě použity v praxi, proto se předpokládalo naměření kvalitních dat.

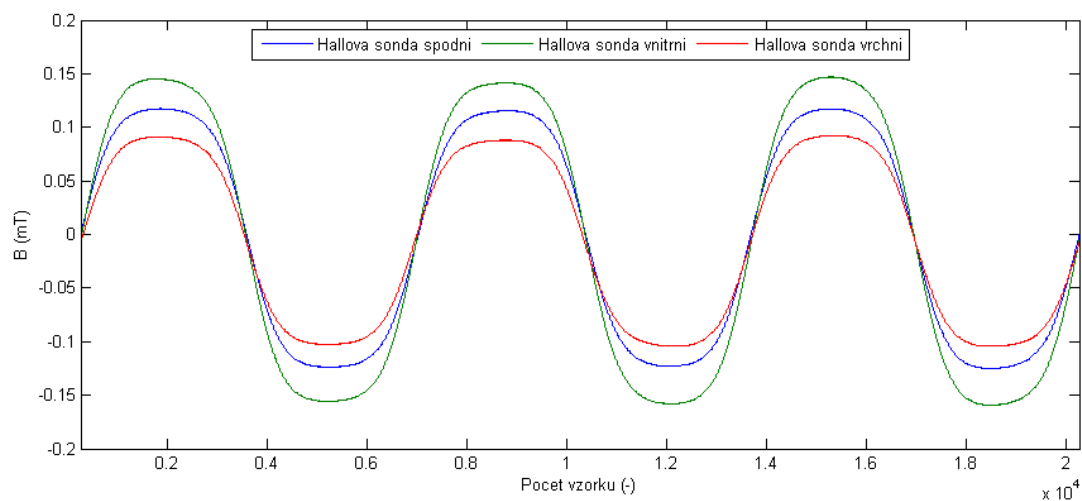
Zelený průběh jsou data naměřené vnitřní Hallovou sondou, jsou největší. To je způsobeno umístěním do středu měřeného rotoru, kde je největší magnetická indukce. Modrý průběh je ze spodní Hallové sondy a nejmenší červený průběh, je z vrchní Hallové sondy. Na obrázku 16. je schematické umístění sond vůči měřenému rotoru. Jak je vidět na obrázku sondy nejsou rovnoměrně rozmístěny. To způsobuje naměřené rozdílné hodnoty vrchní a spodní sondy.



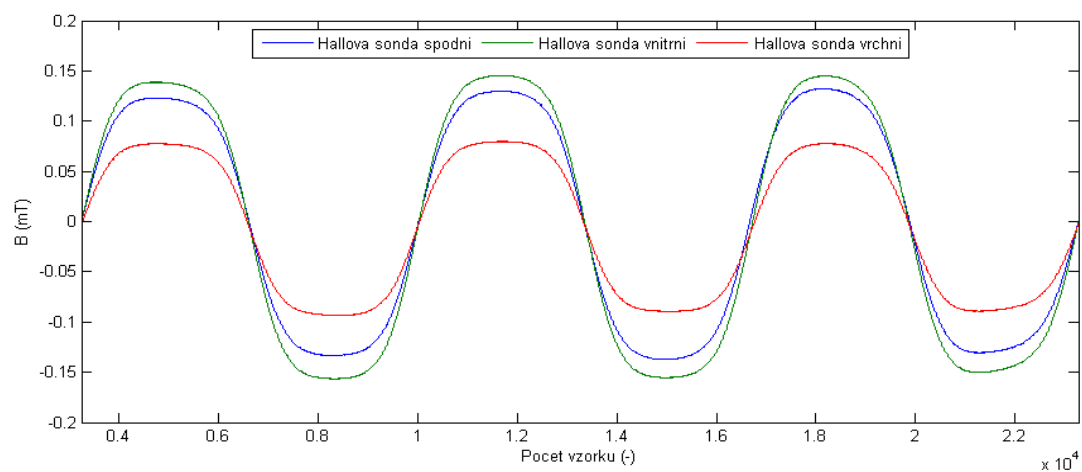
Obrázek 17 Schéma rozmístění Hallových sond



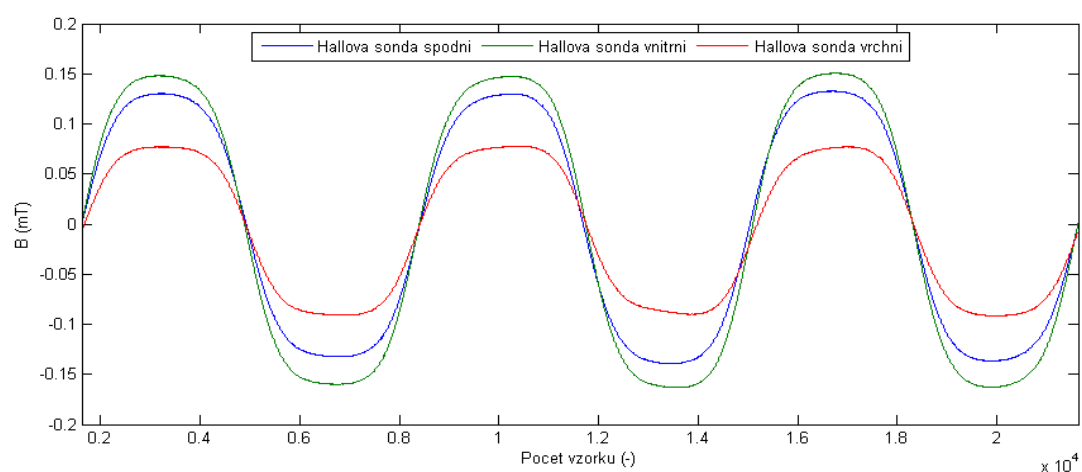
Graf 1 Naměřená indukce prvního rotoru



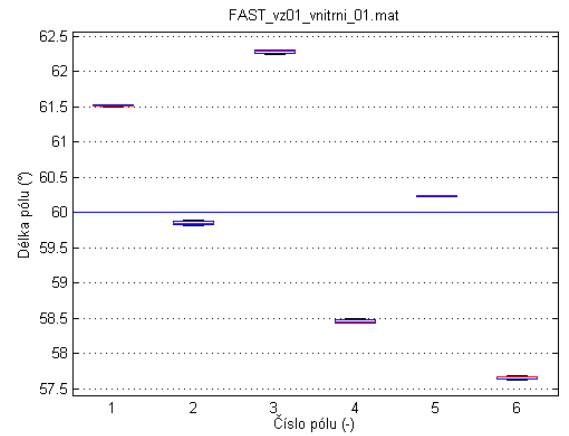
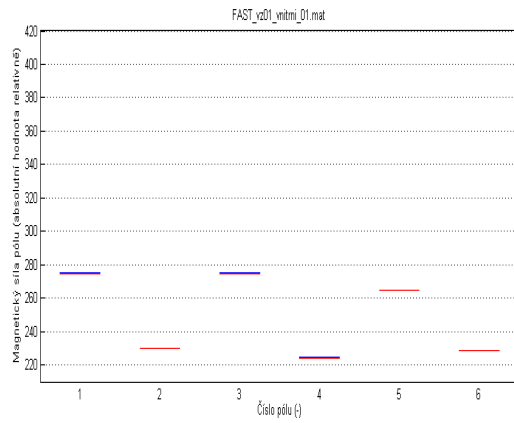
Graf 2 Naměřená indukce druhého rotoru



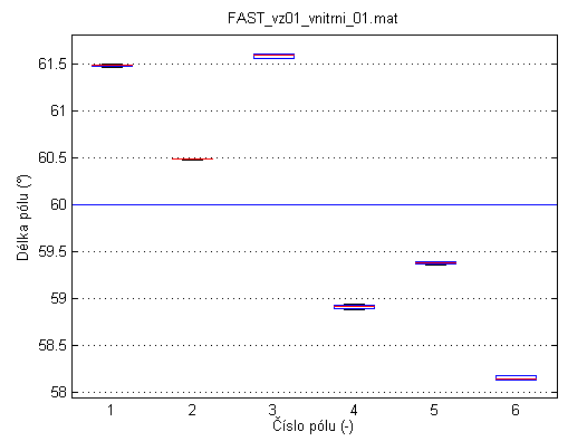
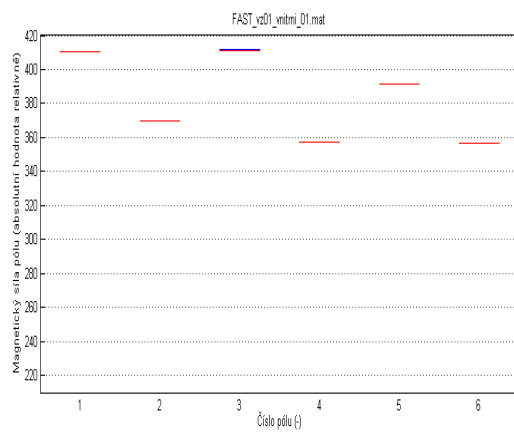
Graf 3 Naměřená indukce třetího rotoru



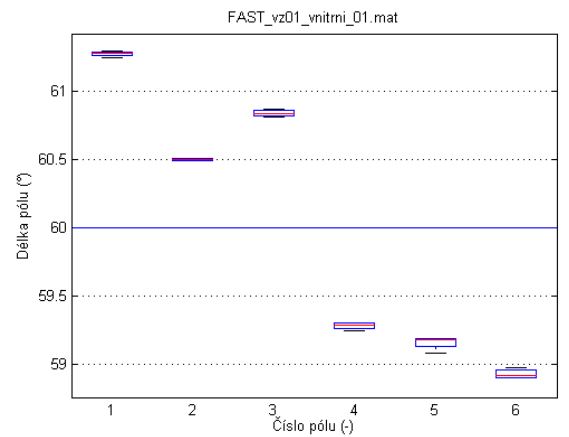
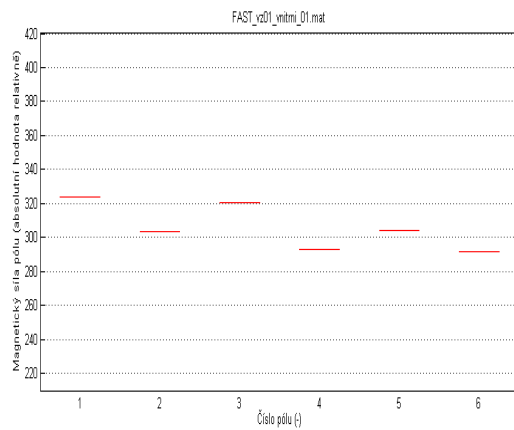
Graf 4 Naměřená indukce čtvrtého rotoru



Vrchní sonda

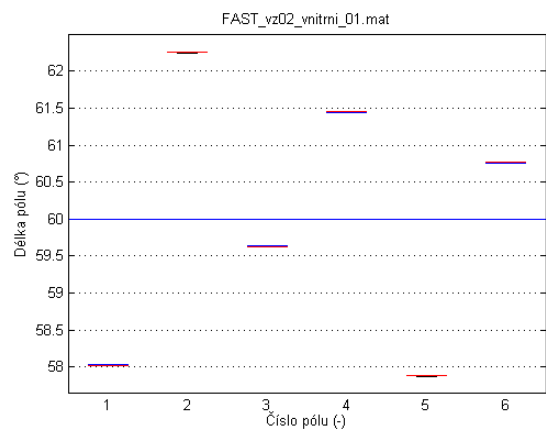
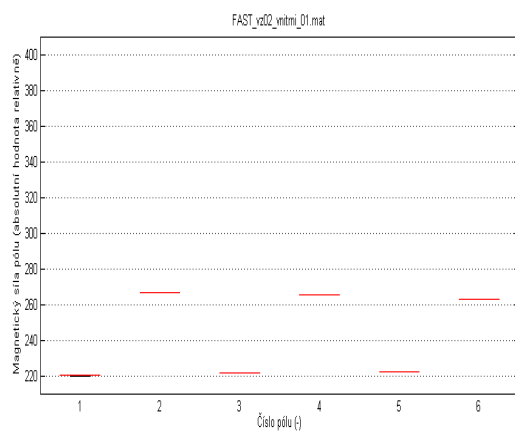


Vnitřní sonda

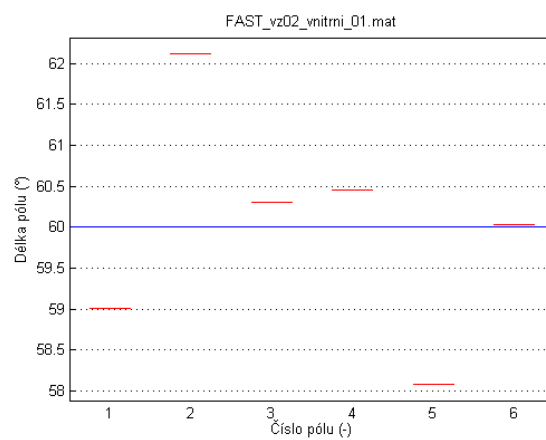
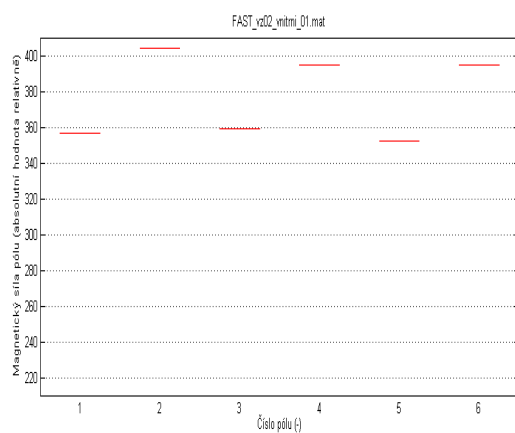


Spodní sonda

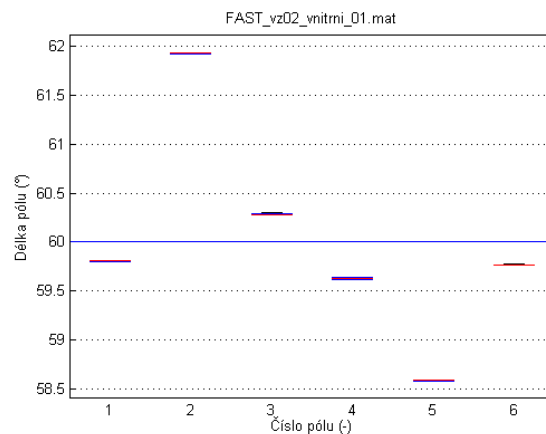
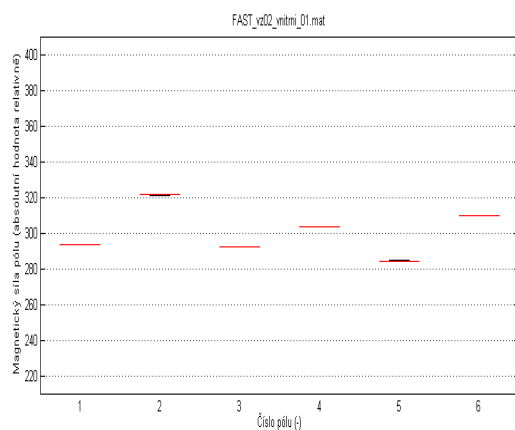
Graf 5 Velikost magnetické síly pólů (vlevo), vyhodnocení délky pólů (vpravo), pro 1. vzorek



Vrchní sonda

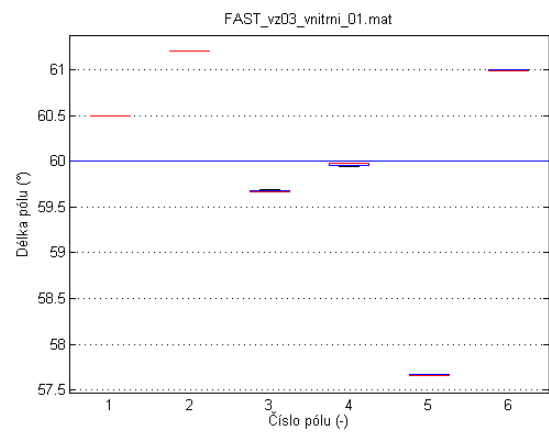
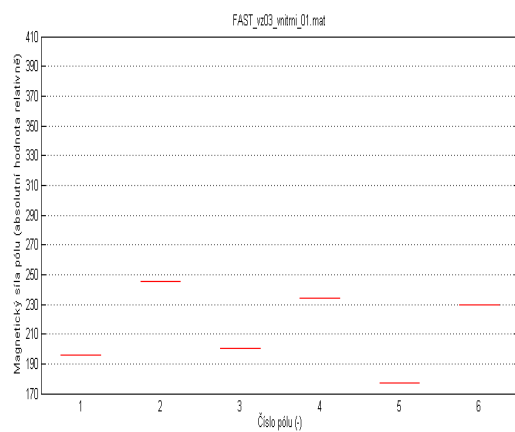


Vnitřní sonda

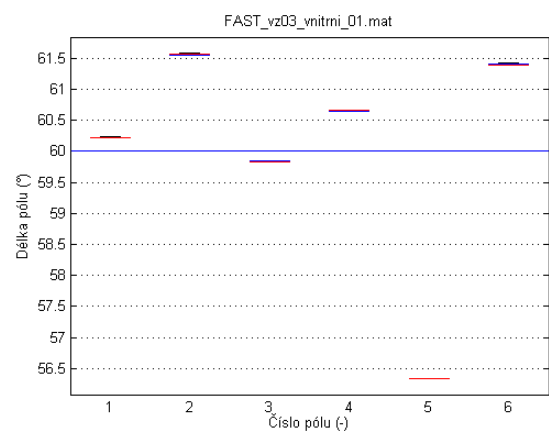
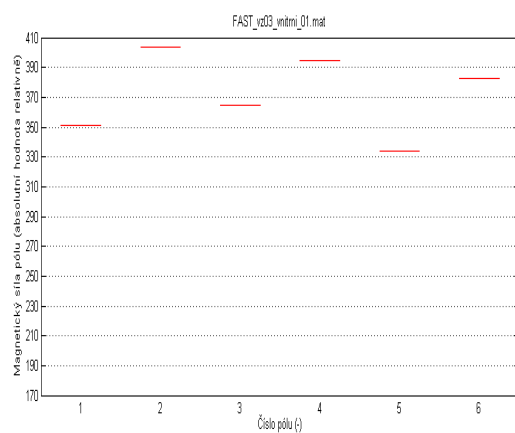


Spodní sonda

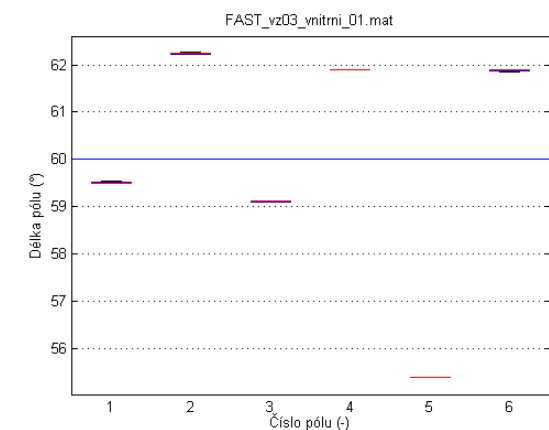
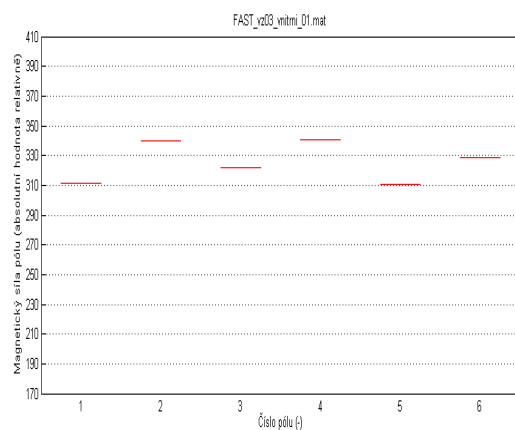
Graf 6 Velikost magnetické síly pólů (vlevo), vyhodnocení délky pólů (vpravo), pro 2. vzorek



Vrchní sonda

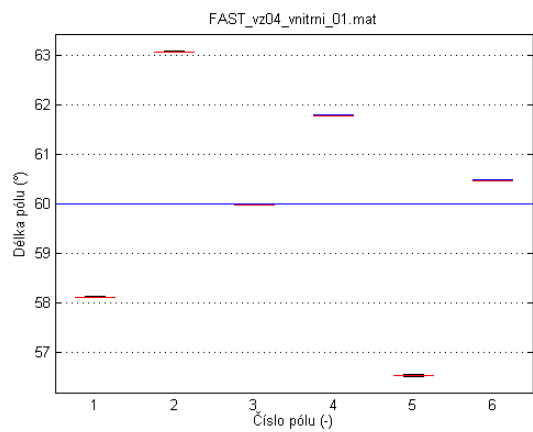
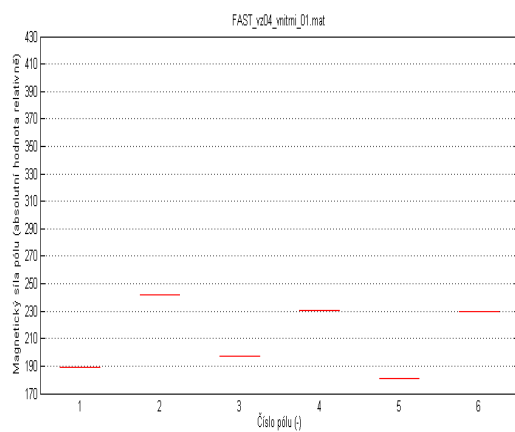


Vnitřní sonda

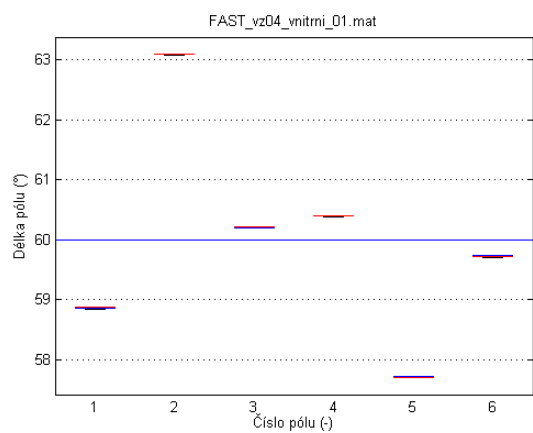
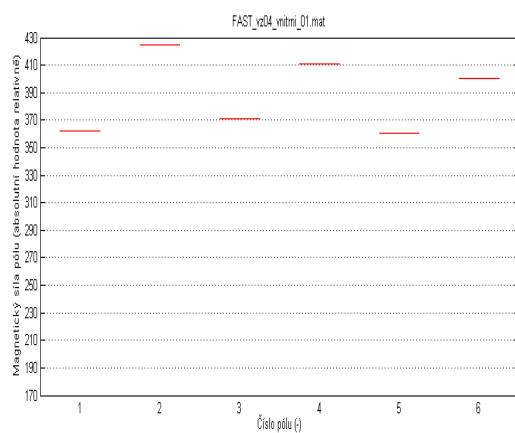


Spodní sonda

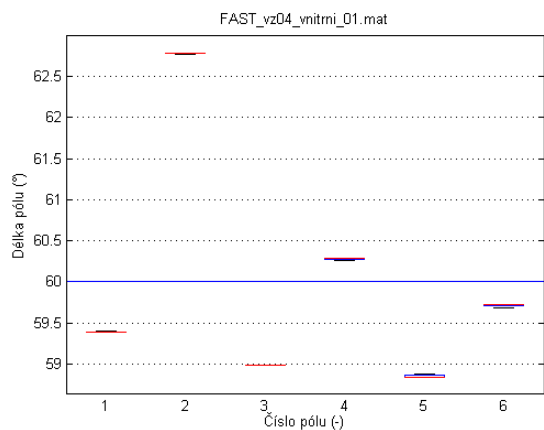
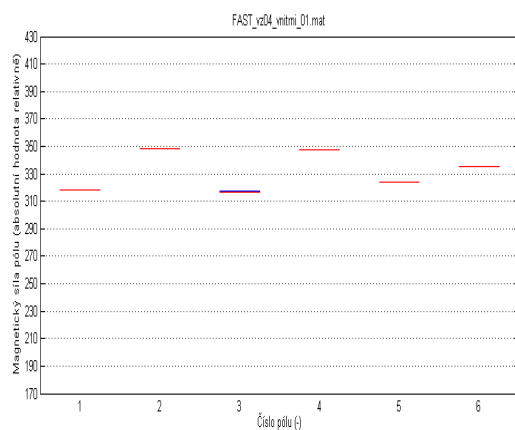
Graf 7 Velikost magnetické síly pólů (vlevo), vyhodnocení délky pólů (vpravo), pro 3. vzorek



Vrchní sonda



Vnitřní sonda



Spodní sonda

Graf 8 Velikost magnetické síly pólu (vlevo), vyhodnocení délky pólu (vpravo), pro 4. vzorek

Z dosažených výsledků lze konstatovat, že velikost magnetické indukce se pohybuje od $-0,1632 \text{ mT}$ po $0,1507 \text{ mT}$, obě tyto hodnoty byly naměřeny na posledním čtvrtém vzorku, viz graf 4. U průběhu čtvrtého vzorku je vidět jasná nesymetrie především u vrchní sondy. Není jasné, zda je to způsobeno přímo vadným rotorem nebo zda rotor byl špatně upevněn.

Největší magnetická síla rotorů byla naměřena vždy vnitřní sondou, jak bylo zmíněno výše. Je zajímavé, že magnetická síla prvního a druhého rotoru jsou téměř shodné, kdežto v porovnání se třetím a čtvrtým rotorem se liší téměř o 15 %. A to ani ne u záporných pólů magnetu (naměřeny jako sudé), jako v u pólů kladných (liché). U prvního a druhého vzorku je velikost síly měřené vrchní sondou kladného pólu cca 220 zatímco u třetího a čtvrtého vzorku je to hodnota 170. Rozdíly velikosti jednotlivých pólů nepřesahují 5 %.

U vyhodnocení délky pólů je logicky nutné, aby jejich součet byl 360° . Pokud máme jeden pól výrazně delší, pak musí být jeden nebo více pólů výrazně kratších, nebo se střídají jeden delší a jeden kratší. Největší naměřená hodnota byla u rotoru 4 a to $63,2^\circ$, naopak nejmenší naměřená hodnota byla $55,4^\circ$.

7 Závěr

Výsledkem této bakalářské práce je měřicí stanoviště pro vyhodnocení magnetických vlastností konkrétního rotoru BLDC motoru. Vytvořený program pro vyhodnocení umožňuje zobrazení polarizace jednotlivých pólů a velikost magnetické síly. Pro identifikaci velikosti jednotlivých pólů z naměřených dat byl použit algoritmus detekce průchodu magnetické indukce nulou.

Toto měřicí stanoviště bylo navrženo pro použití v průmyslové praxi. Byl kladen důraz na snadnou uživatelskou obsluhu a rychlost měření a zpracování dat. Samotné měření trvá asi 10 s. Vyhodnocení výsledků se provádí automaticky vytvořeným programem.

K vyhodnocení a posouzení kvality měřeného rotoru bylo k dispozici malé množství vzorků (pouze čtyři). Určení hranice, kdy je rotor použitelný a kdy je vadný, proto nebylo možné. K tomu bychom potřebovali buď větší počet vzorků ke statistickému zhodnocení nebo zpětnou vazbu z testů kompletních BLDC motorů, kde je jasné, který motor je bezvadný a který trpí nepříjemnými vibracemi způsobenými chybně zpolarizovaným rotorem.

K dokončení stanoviště zbývá právě určit rozhodovací úroveň naměřeného signálu pro vadné rotory.

9 Použitá literatura

- [1] RYDLO, Pavel. *Řízení elektrických střídavých pohonů*. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 2006, 129 s. ISBN 80-737-2117-1.
- [2] DORRELL, David G, Mircea POPESCU a Dan M IONEL. Unbalanced Magnetic Pull Due to Asymmetry and Low-Level Static Rotor Eccentricity in Fractional-Slot Brushless Permanent-Magnet Motors With Surface-Magnet and Consequent-Pole Rotors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010, roč. 46, č. 7, s. 2675-2685. ISSN 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2044582. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5427139>
- [3] FU, Jiajing, Changsheng ZHU a Dan M IONEL. Subdomain Model for Predicting Magnetic Field in Slotted Surface Mounted Permanent-Magnet Machines With Rotor Eccentricity. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012, roč. 48, č. 5, s. 1906-1917. ISSN 0018-9464. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2178250. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6095632>
- [4] KYUNG-TAE KIM, Jiajing, Changsheng KWANG-SUK KIM, Dan M SANG-MOON HWANG, TAE-JONG KIM a YOONG-HO JUNG. Comparison of magnetic forces for IPM and SPM motor with rotor eccentricity. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012, roč. 37, č. 5, s. 3448-3451. ISSN 00189464. DOI: 10.1109/20.952634. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=952634>
- [5] LACKO, R. Testovací pracoviště pro analýzu vlastností permanentních magnetů pro elektrické pohony. Pardubice, 2011. 56 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [6] SKALICKÝ, J. *Elektrické regulované pohony*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [7] VOLF, T. *Analýza magnetického pole pomocí MKP a magnetické sondy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Skalka.
- [8] SEDLÁK, Bedřich. *Elektrina a magnetismus*. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002, 632 s. ISBN 80-200-1004-1.
- [9] Micro switch sensing and control. Hall effect sensing and application. [pdf dokument]. [cit. 16. 2. 2013]. Dostupný z:
<http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/141060/la_id/1/document/1/re_id/0>.

- [10] Kolektiv autorů: Seriál firmy Uzimex, [online]. (duben 2013)
URL: http://www.uzimex.cz/download.php?file=/soubory/20070103_maxon_serial.pdf
- [11] HOŘAVA, J. Modelování a simulace vektorového řízení EC motorů v prostředí Simulink. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Toman.
- [12] ROUN, Jan. *Systém pro mapování magnetických anomáli s využitím fluxgate gradiometrů*. Praha, 2011. Dostupné z:
http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/DP_2011_Roun_locked.pdf. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce ing. Michal Janoušek.
- [13] Allegro MicroSystems, Inc. A1301 and A1302: Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors [online]. 2005 [cit. 2013-04-27]. Datasheet. Dostupné z WWW:
<http://www.allegromicro.com/~Media/Files/Datasheets/A1301-2-Datasheet.ashx>

Internetové odkazy

- [14] NI USB-621X User Manual. [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371931f.pdf>
- [15] NI USB 6212. [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://ese.wustl.edu/ContentFiles/Research/UndergraduateResearch/CompletedProjects/WebPages/sp09/JoshuaYork/daq.html>
- [16] Supermagnety.cz [online]. 2003 [cit. 2013-03-26]. Permanentní magnety. Dostupné z WWW: <http://www.supermagnety.cz/i>.
- [17] Orientalmotor. [online]. [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: http://www.orientalmotor.eu/Products/Stepper_motors/Stepper_motors/
- [18] Kontroler M1486. [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.microcon.cz/pdf2013/06-07.pdf>

Seznam obrázků

Obr. 1 Konstrukce BLDC s permanentními magnety Zdroj:Control Engineering.....	11
Obr. 2 Spínání pomocí polohy rotoru převzato z [11].....	12
Obrázek 3 Krystalografická buňka krystalu SmCo5 převzato z [16]	15
Obrázek 4 Krystalografická buňka krystalu Nd ₂ Fe ₁₄ B převzato z [16]	16
Obrázek 5 Hallův prvek převzato [8]	18
Obrázek 6 Pouzdro SOT23W převzato z [13].....	19
Obrázek 7 Blokové schéma Halllovy sondy převzato z [13]	19
Obrázek 8 Schéma zapojení měřicího stanoviště	20
Obrázek 9 Měřicí stanoviště	20
Obrázek 10 Měřicí karta NI USB 6212	21
Obrázek 11 Schéma analogového vstupu převzato z [14].....	22
Obrázek 12 Vytvořený držák v programu Solid Edge ST5.....	23
Obrázek 13 Schéma zapojení měřicí hlavy	24
Obrázek 14 Návrh plošného spoje.....	24
Obrázek 15 Uživatelský vstup.....	27
Obrázek 16 Objasnění vyhodnocení.....	31
Obrázek 17 Schéma rozmístění Hallových sond.....	32

Seznam tabulek

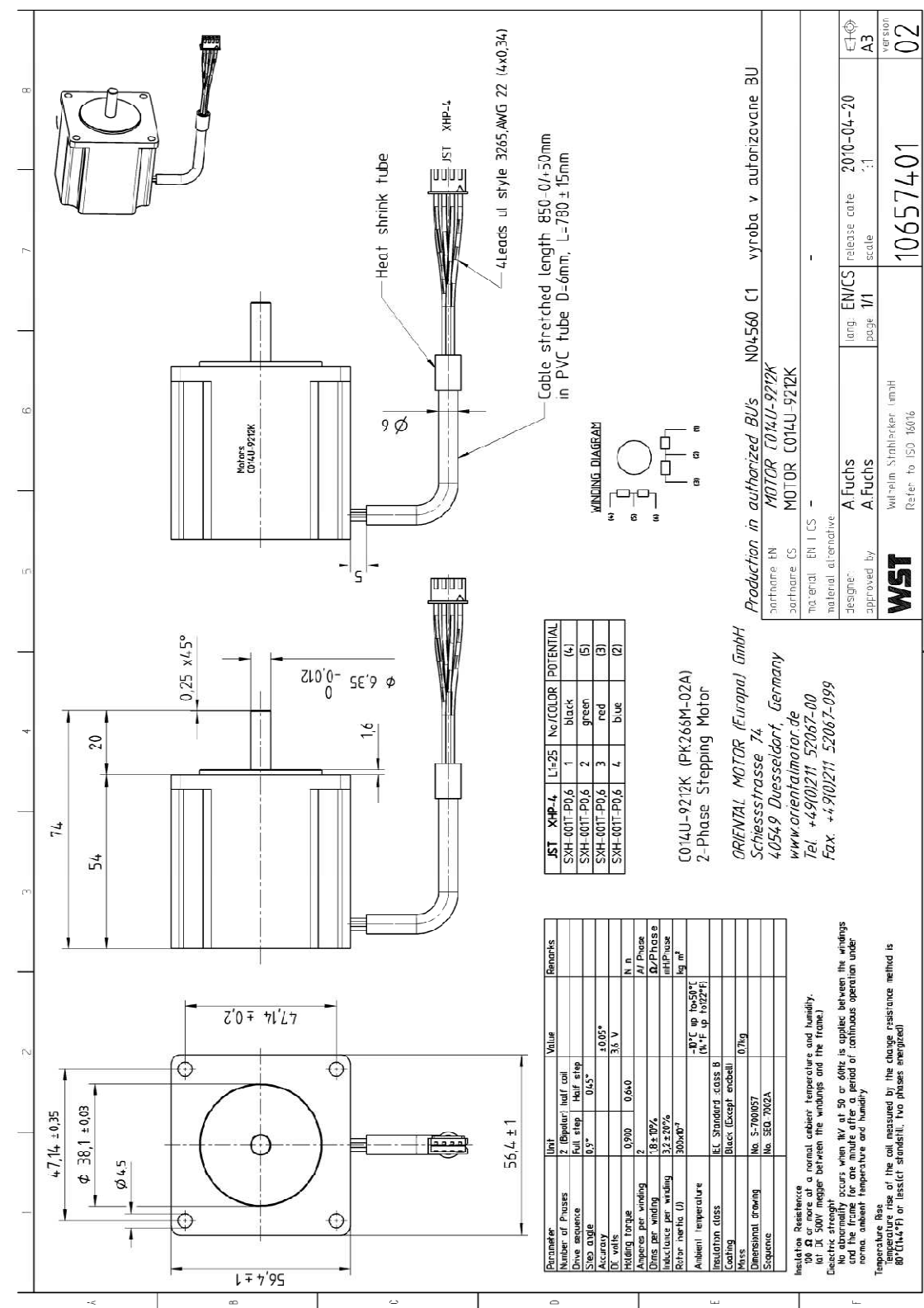
Tabulka 1 Vybrané parametry hallovy sondy převzato s upravani z [13].....	18
---	----

Seznam Grafů

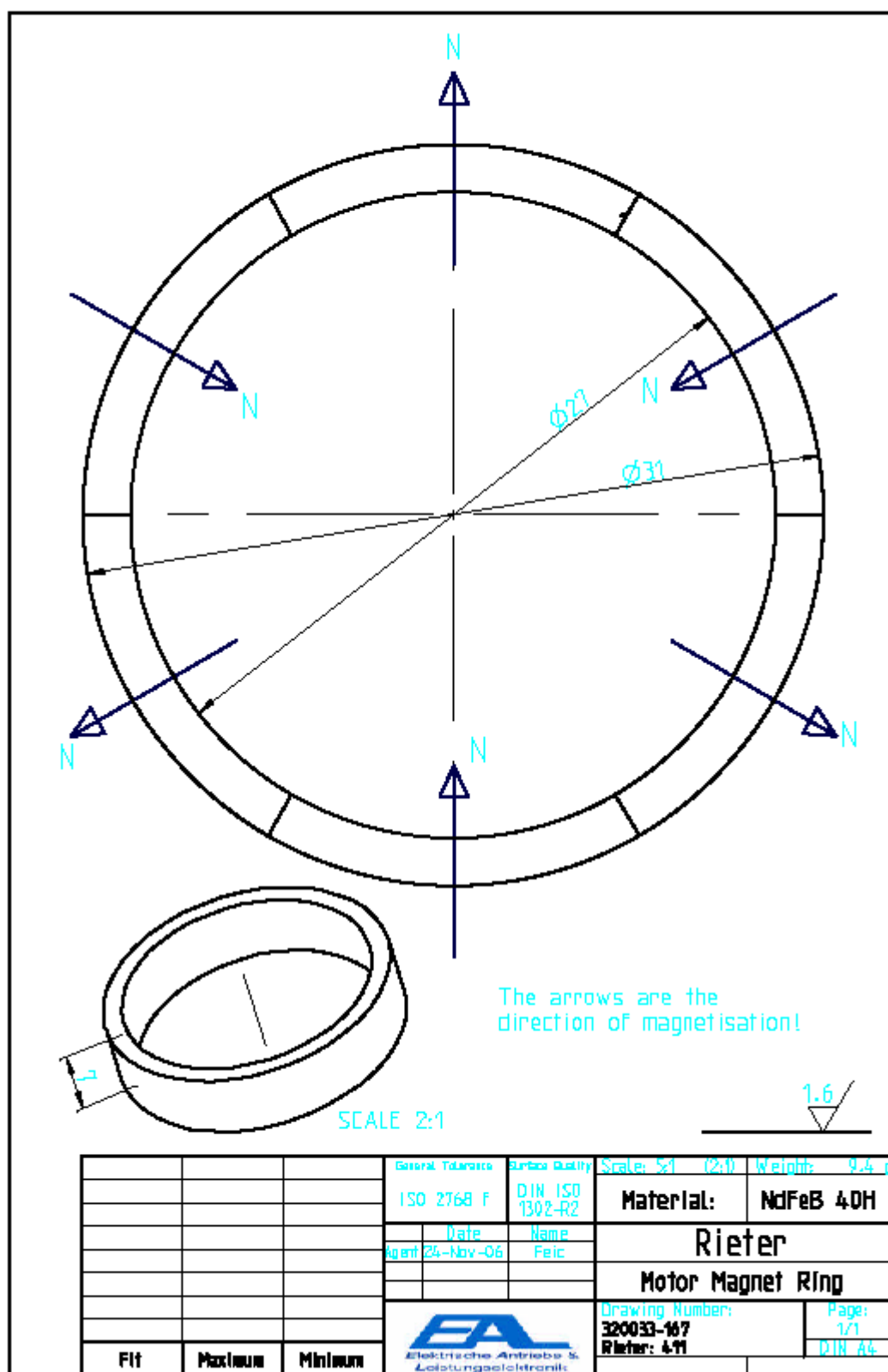
Graf 1 Naměřená indukce prvního rotoru.....	32
Graf 2 Naměřená indukce druhého rotoru.....	33
Graf 3 Naměřená indukce třetího rotoru.....	33
Graf 4 Naměřená indukce čtvrtého rotoru.....	33
Graf 5 Velikost magnetické síly pólů (vlevo), vyhodnocení délky pólů (vpravo), pro 1. vzorek	34
Graf 6 Velikost magnetické síly pólů (vlevo), vyhodnocení délky pólů (vpravo), pro 2. vzorek	35
Graf 7 Velikost magnetické síly pólů (vlevo), vyhodnocení délky pólů (vpravo), pro 3. vzorek	36
Graf 8 Velikost magnetické síly pólů (vlevo), vyhodnocení délky pólů (vpravo), pro 4. vzorek	37

10 Přílohy

Příloha A Motor pro pohyb rotoru



Příloha B Měřený rotor



Příloha C Výkres držáku

